



Étude des couches MAC dédiées à l'UWB

Nezo Ibrahim Fofana, Adrien van den Bossche, Thierry Val

► To cite this version:

Nezo Ibrahim Fofana, Adrien van den Bossche, Thierry Val. Étude des couches MAC dédiées à l'UWB. Journées Nationales des Communications Terrestres - JNCT 2014, May 2014, Toulouse, France. pp. 8-19. hal-01138104

HAL Id: hal-01138104

<https://hal.science/hal-01138104>

Submitted on 1 Apr 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Open Archive TOULOUSE Archive Ouverte (OATAO)

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in : <http://oatao.univ-toulouse.fr/>
Eprints ID : 13075

To cite this version : Fofana, Nezo Ibrahim and Van den Bossche, Adrien and Val, Thierry *Étude des couches MAC dédiées à l'UWB*. (2014) In: Journées Nationales des Communications Terrestres - JNCT 2014, 22 May 2014 - 23 May 2014 (Toulouse, France).

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: staff-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

Etude des couches MAC dédiées à l'UWB

Nezo Ibrahim FOFANA, Adrien VAN DEN BOSSCHE et Thierry VAL
Université de Toulouse, UT2J - Laboratoire CNRS-IRIT-IRT – IUT Blagnac
{Nezo-Ibrahim.Fofana, Adrien.Van-Den-Bossche, thierry.val}@irit.fr

Résumé : La norme IEEE 802.15.4a UWB offre un moyen de communication adapté aux environnements où la localisation de nœuds mobiles par mesure de temps de vol est nécessaire, en particulier pour ses capacités à obtenir une grande précision de mesure de distance entre deux nœuds communicants. La couche physique basée sur l'hyper étalement de spectre présente des caractéristiques originales qu'il est nécessaire de prendre en compte pour proposer une couche d'accès au médium la plus adaptée possible aux échanges de trames dévolus à la mesure du temps de vol (ToF) entre les nœuds du réseau. Cet article présente cette étude bibliographique des couches bases de UWB, première étape dans ce travail de thèse.

Mots clés : Réseaux sans fil, WSN, localisation, UWB, 802.15.4a, Range-based

1. INTRODUCTION

Utilisée depuis les années 1960, la technologie UWB fut autorisée en 2002 par la FCC (organisme de réglementation américain) pour des applications commerciales. Cette technologie consiste à émettre des impulsions de très courtes durées inférieures à 2 ns. Cette résolution temporelle permet d'offrir une large bande passante mais surtout une très grande capacité de mesure de distance (*Ranging*) basée sur le temps de vol du signal UWB [1].

Cet article présente une étude des couches MAC existantes dédiées à l'UWB aux performances très prometteuses.

Il est nécessaire de faire tout d'abord une analyse des couches 1 et 2 d'UWB, ce qui permettra ensuite d'étudier une localisation d'objets communicants basée sur le temps de vol (*ToF*).

2. ETAT DE L'ART

2.1. HISTORIQUE DE L'UWB

Le sigle UWB a été proposé pour la première fois par le Département de la Défense (DoD) aux Etats-Unis en 1989 afin de qualifier ce moyen de communication.

Son compromis portée/débit très attractif ainsi que l'opportunité de réutiliser des bandes de fréquences déjà allouées dans le spectre ont été des facteurs clés qui ont déclenché l'engouement du monde industriel pour la radio impulsionnelle.

Après plusieurs années d'études et d'enquêtes et sous la pression des industriels qui souhaitent promouvoir l'UWB, la *Federal Communications Committee* (FCC : organisme américain de réglementation du spectre) a finalement publié, le 14 avril 2002, une position autorisant les systèmes UWB. Ainsi, les signaux UWB sont autorisés aux Etats-Unis dans la bande [3.1-10.6] GHz tant que leur Densité Spectrale de Puissance (DSP) moyenne n'excède pas -41.3 dBm/MHz avec une largeur de bande minimale de 500 MHz, protégeant ainsi la transmission d'autres signaux provenant d'utilisateurs de cette partie du spectre.

La normalisation de la technologie a été confiée en 2003 à un groupe de travail composé d'UWB Forum et WiMedia Alliance en vue de mettre en place la norme IEEE 802.15.3a.

Ces deux organismes n'arriveront pas à se mettre d'accord sur des choix techniques (*Direct Sequence UWB* pour l'UWB Forum et OFDM UWB pour la WiMedia Alliance). Cela va aboutir à la dissolution du groupe IEEE 802.15.3a. UWB Forum et WiMedia Alliance ont cependant annoncé qu'ils continueraient de travailler séparément sur le développement et la promotion de l'UWB. Entre temps, Motorola et Freescale ont quitté l'UWB Forum.

Cependant, l'arrivée de la norme IEEE 802.15.4 et des communications *machine to machine* (M2M) et notamment pour les applications de réseaux de capteurs sans fil, a fait émerger le besoin de définir une interface radio à bas débit. La diminution des débits a permis de réduire les contraintes de transmission et ainsi repositionner l'UWB impulsionnelle comme un candidat prometteur.

En 2004, le groupe de travail IEEE 802.15.4a sera créé avec pour objectif la standardisation d'une couche physique alternative à celle choisie par le groupe IEEE 802.15.4 en apportant de meilleurs performance et surtout un nouveau service de mesure précise de la distance(*Ranging*).

En décembre 2005, l'OFDM, solution multi bande soutenue par l'Alliance WiMedia sera adoptée en tant que norme par l'ECMA (ECMA-368).

En août 2007, la norme IEEE 802.15.4a sera publiée et adopté par l'IEEE : ce sera le standard IEEE 802.15.4a-2007.

2.2. PRESENTATION DU STANDARD IEEE 802.15.4A-2007

Étant données, les puissances autorisées pour émettre un signal UWB afin de ne pas perturber les autres signaux radios déjà en place (comme l'UMTS, WiMAX, WiFi) (cf. figure 1), les puissances ont été limitées à -41,3dBm/MHz. Ces systèmes sont limités à une portée de 10 à 100 mètres suivant les débits utilisés. Les applications associées à l'UWB sont les systèmes WPAN (*Wireless Personal Area Network*), les capteurs, les systèmes d'imagerie et les radars pour les véhicules.

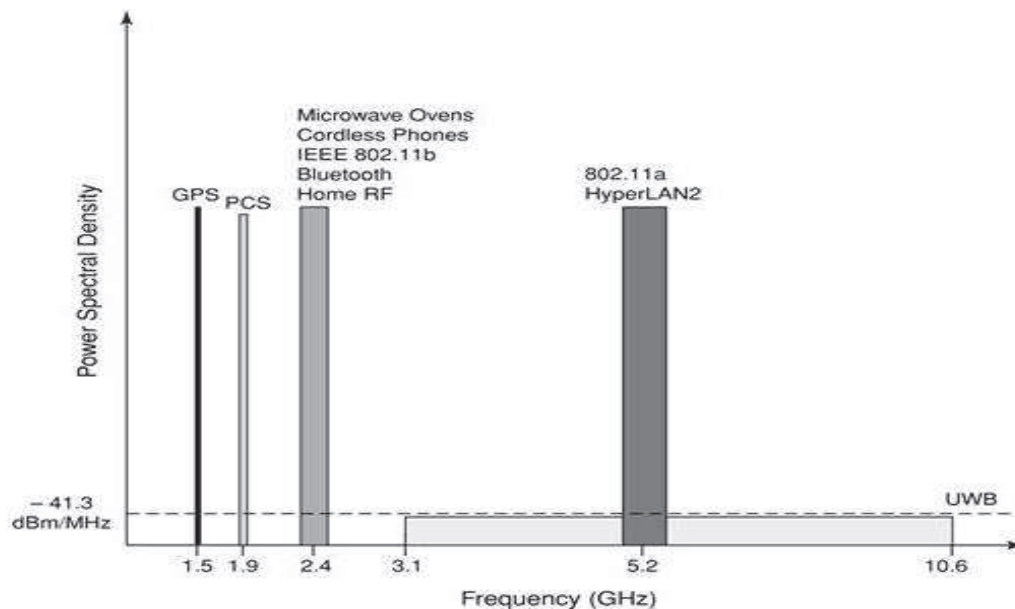


Figure 1 : Bande de fréquence du signal UWB. [1]

Cependant, les valeurs fixées par la FCC restent valables seulement aux Etats-Unis, la puissance permise est inférieure en Europe dans la réglementation dictée par l'ECC (*Electronic Communications Committee*).

En Europe, l'ouverture du spectre à l'UWB a été menée avec plus de précautions et a d'abord abouti à un masque divisé en 2 bandes distinctes, pour protéger la bande autour de 5 GHz où émettent des systèmes radio à infrastructures fixes tels que les réseaux wifi IEEE 802.11. (cf. figure 2).

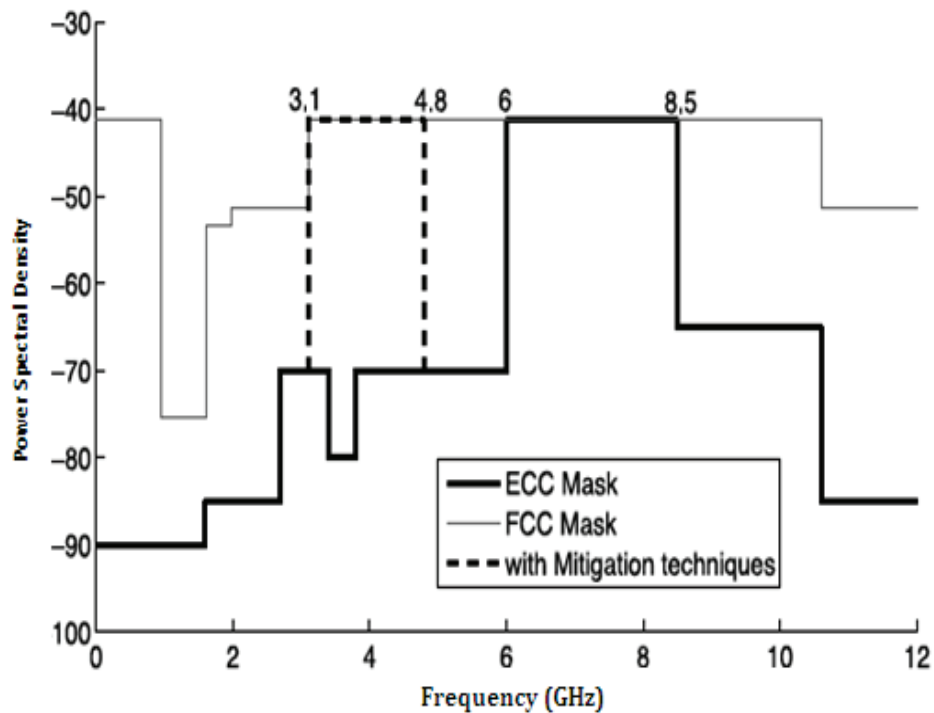


Figure 2 : Masque d'émission des signaux UWB autorisés en Europe et aux États-Unis (FCC). [1]

On distingue la bande basse entre 3.1 et 4.8 GHz et la bande haute au dessus de 6 GHz. Pour l'Europe, cette bande haute est comprise entre 6 et 8.5 GHz. Dans la bande haute, les limites d'émission des systèmes UWB sont les mêmes qu'aux Etats-Unis (-41,3 dBm/MHz), mais on voit ici qu'à l'échelle du globe, il n'existe plus que 1.25 GHz de bande utilisable avec un niveau d'émission harmonisé (contre les 7.5 GHz initialement ouverts aux USA). L'accès à la bande basse est plus rigoureux puisque la protection des services mobiles existants et futurs est renforcée par rapport aux Etats-Unis. Par exemple l'instance européenne de réglementation du spectre, l'ECC, a considéré que la limite en DSP moyenne à -41.3 dBm/MHz était insuffisante car elle mettait en danger le système UMTS en pouvant engendrer une hausse du plancher de bruit des stations de base et induire un effet dévastateur sur la boucle de contrôle de puissance.

De même, l'ECC a souhaité mieux protéger les bandes d'extension de l'UMTS et du 3GPP *Long Term Evolution*, notamment à 2.7 GHz dans la bande [3.4-3.6] GHz. C'est pourquoi l'Europe a statué en interdisant le déploiement en extérieur de systèmes d'émission UWB fixes et impose une limite d'émission en DSP située entre -85 et -70 dBm/MHz comme l'indique la figure 2.

Frequency range	Maximum mean EIRP density (dBm/MHz)	Maximum peak EIRP density (dBm/50MHz) (Note 2)
Below 1.6 GHz	-90	-50
1.6 to 3.8 GHz (Note 1)	-85	-45
3.8 to 4.8 GHz (Note 1)	-70	-30
4.8 to 6 GHz	-70	-30
6 to 8.5 GHz	-41.3	0
8.5 to 10.6 GHz	-65	-25
Above 10.6 GHz	-85	-45
Note 1—ECC is still considering whether to adopt a separate decision covering the 3.1–4.8 GHz frequency band. Note 2—The peak EIRP can be alternatively measured in a 3 MHz bandwidth. In this case, the maximum peak EIRP limits to be applied is scaled down by a factor of $20\log(50/3) = 24.4$ dB.		

Tableau 1 : Masque UWB pour l'Europe. [1]

Cependant, cette décision [2] est assortie d'un relâchement de cette contrainte à un niveau de -41.3 dBm/MHz si l'émission UWB implémente une technique de réduction d'interférence dans la bande [3.1-4.8] GHz. L'ECC prévoit 2 techniques possibles qui sont la limitation du facteur d'activité ou la détection et l'évitement de signaux dits primaires dans la bande.

Aujourd'hui, le principal système protégé par ces techniques de limitation d'interférence est le WiMAX qui opère dans une bande située à 3.5 GHz. Le document [2] précise les conditions d'application des techniques de limitation d'interférence. Par exemple, il fixe les fréquences, les durées et les seuils de détection des systèmes dans la bande pour la technique de détection et évitement (DAA, *Detect and Avoid*).

De même, ce document détaille la technique de limitation du facteur d'activité (LDC pour *Low Duty Cycle*). Ainsi, une émission UWB est autorisée dans la bande [3.1-4.8] GHz à une DSP moyenne de -41.3 dBm/MHz si l'équipement UWB n'émet pas plus de 5 ms en continu et le ratio entre la durée d'émission cumulée T_{on} et la durée de silence cumulée T_{off} n'excède pas 5 % sur une seconde et 0.5 % sur une heure.

Ces valeurs ont été retenues par l'ECC suite à des campagnes de mesures menées sur 2 services victimes que sont le WiMAX et les radars militaires.

2.3. LES DIFFERENTS SIGNAUX UWB

2.3.1. Deux techniques d'émissions

Il existe plusieurs façons de générer les signaux UWB.

L'un des systèmes est l'approche multi-bande avec une modulation de type OFDM [3] supportée par l'alliance Wimedia. Des améliorations des systèmes multi-bande OFDM ont été développées par France Télécom R&D dans le cadre des projets MAGNET (projets européens). Dans le projet IST-FP6 MAGNET, France Télécom R & D a proposé des améliorations au système UWB-OFDM de Wi-Media en considérant un système à efficacité spectrale optimisée grâce à l'ajustement de l'écart inter-porteuse et un système à bandes RF multiples capable de travailler à 60 GHz.

[4] explique la technique MB-OFDM (Multi-Bande OFDM) qui transmet les porteuses multiples simultanément de façon espacée sur des fréquences précises. L'utilisation d'algorithmes de transformée de fourrier rapides garantit une grande efficacité énergétique dans les cas de trajets multiples, tout en n'augmentant que légèrement la complexité de l'émetteur. Les bénéfices de cette solution MB-OFDM incluent la flexibilité et la forte élasticité spectrale ainsi qu'une forte résistance aux interférences radio et aux effets provenant des trajets multiples.

Les techniques de modulation OFDM ont été appliquées avec succès à de nombreux systèmes de communication commercialisés aux performances élevées, notamment Wi-Fi 802.11a/g, WiMAX 802.16.a, HomePlug et les normes ADSL.

L'autre système est généré à partir d'impulsion large bande radio (DS-UWB : *Direct Spectrum - Ultra Wide Bande*), technique soutenue par l'UWB Forum.

Le format de la bande très large à séquence directe (DS-UWB) est souvent appelé technologie porteuse d'impulsion. La DS-UWB fonctionne en envoyant des impulsions à faible énergie reçues de manière cohérente au niveau du récepteur.

Chacune de ses impulsions DS-UWB a une durée très courte. Elle est généralement comprise entre 10 et 1000 picosecondes, et par conséquent, elle est plus courte que la durée d'un unique bit issu des données à transmettre. Une durée d'impulsion courte signifie que les effets de trajets multiples peuvent généralement être ignorés, donnant lieu à un grand degré de résilience lors des transmissions UWB à large bande lorsque le trajet du signal est à l'intérieur des bâtiments.

Compte tenu de la large bande passante sur laquelle les transmissions DS-UWB sont réparties, la densité d'énergie réelle est extrêmement faible. Typiquement, un émetteur DS-UWB peut transmettre moins de 75 nW par Mhz. Lorsqu'il est intégré sur la bande passante totale de la transmission, cela signifie que les transmissions sont autour de 0,25 milliwatts (mW). Ceci est très faible comparativement à 802.11.

Nous avons présenté deux techniques de transmission MB-OFDM et DS-UWB. Notre thèse portera sur la dernière : la radio impulsionnelle bas débit DS-UWB soutenue d'ailleurs par la norme IEEE 802.15.4a. Le matériel disponible [11] pour notre sujet de thèse ne permet pas de traiter du signal MB-OFDM.

2.3.2. Modulation de l'information

La transmission de l'information se fait en émettant une impulsion codant chaque bit d'information. Les modulations utilisées pour transmettre l'information sont les suivantes :

- Modulation par polarité de l'impulsion (appelée BPSK pour *Binary Phase Shift Keying*) où l'information est transmise par l'émission d'une impulsion avec un déphasage de 0 ou π .
- La modulation par position (PPM) où la valeur binaire 1 est distinguée de la valeur 0 en retardant l'émission de l'impulsion par rapport au temps bit d'émission.
- Modulation Tout-ou-Rien (OOK pour *On Off Keying*) : sans doute la modulation la plus intuitive, elle consiste à émettre une impulsion si le bit est à 1 et rien dans le cas contraire. Elle est également la modulation la plus simple à implémenter et est particulièrement adaptée à des récepteurs non cohérents à détection d'énergie. elle favorise une faible consommation d'énergie.

2.4. LES METHODES D'ACCES DEDIEES A L'UWB

Dans un réseau, le problème majeur consiste à savoir qui a le droit d'émettre à un moment donné. Pour cela, des protocoles de niveau 2 ont été conçus afin de résoudre ce problème. Ces protocoles servant à désigner le prochain nœud qui sera autorisé à envoyer des informations sur le réseau sont implémentés dans une sous-couche interne à la couche liaison de données appelée sous-couche d'accès de contrôle au canal ou sous-couche MAC (Medium Access Control). Cette sous-couche joue un rôle très important dans les réseaux LAN, WLAN et WPAN, et plus particulièrement dans ceux dont le fonctionnement repose sur le principe de l'accès multiple.

2.4.1. Rôle de la couche MAC

La couche 2 est responsable de la gestion du lien radio au sens large. La sous-couche MAC gère plus particulièrement, les accès au médium. Elle est responsable de la commande de l'émission de paquets d'acquittement des données reçues, de l'accès au canal. Elle contrôle l'activité du module radio en le faisant passer du mode inactif au mode émission lorsqu'un paquet doit être envoyé. En fonction du protocole implémenté, la couche MAC va réaliser un ensemble de tâches afin d'arbitrer l'émission effective du paquet.

2.4.2. Contraintes liées à la couche MAC

Nous avons vu que les contraintes liées aux réseaux de capteurs étaient la minimisation de l'énergie consommée par un nœud. C'est dire que pendant la conception du protocole MAC, il est primordial d'identifier les principales sources de gaspillage d'énergie et à chercher à les réduire.

Dans un réseau sans fil asynchrone et sans précaution spécifique, la couche MAC ne peut prédire l'arrivée d'un paquet. La radio d'un nœud reste ainsi allumée (et consomme beaucoup) dans l'attente d'un hypothétique paquet. Il est important de mettre en place un mécanisme afin de mettre en veille les différents nœuds et un rendez vous afin qu'ils puissent écouter le réseau par la suite. L'une des causes du gaspillage d'énergie est sans doute les collisions. Une collision entre deux émissions induit une réémission de ces paquets, synonyme d'une dépense d'énergie supplémentaire. Le surcoût du protocole est aussi considéré comme une source de gaspillage d'énergie. L'envoi de paquets de contrôle protocolaire, utilisés par exemple pour prévenir les risques de collisions (paquets de réservation de canal RTS/CTS : *Ready To Send/Clear To Send*), l'acquittement des messages reçus (paquets ACK/NACK) ou encore la maintenance d'une synchronisation entre les nœuds et les nombres élevés de bits contenus dans les paquets utiles sont autant de facteurs induisant une consommation importante.

Tous ces facteurs doivent être pris en compte afin de proposer un protocole dédié à la couche MAC.

2.4.3. Revue des protocoles MAC pour les réseaux de capteurs sans fil

Durant cette étude bibliographique, plusieurs protocoles ont été étudiés en commençant par les protocoles décrits par le standard IEEE 802.15.4.a.

Les protocoles ALOHA et CSMA/CA ont été définis comme méthode d'accès pour le standard IEEE 802.15.4.a mais aussi comme méthode pour

la norme IEEE 802.15.4 ; le seul amendement qui a été fait au niveau de l'UWB, est au niveau de la couche PHY, comme son nom l'indique : *Amendment 1-Add Alternate PHYs*.

Le protocole ALOHA fonctionne sans évitement de collision. Son principal avantage est sa simplicité, puisqu'il ne nécessite pas de synchronisation entre les mobiles. Pour un réseau à très faible débit, [1] propose un accès par ALOHA. La justification de ce choix est que la largeur de bande et l'efficacité de traitement d'une couche physique UWB permettent à deux paquets pourtant en collision, d'être parfois démodulés avec succès par deux nœuds récepteurs. Son inconvénient est une probabilité de collision très importante induisant une efficacité faible de 18% dans des cas où le décodage en réception n'est pas possible si deux trames sont émises en même temps. Ce mécanisme ALOHA est donc approprié pour les réseaux à faible charge.

Pour adresser le cas où la charge du réseau est plus importante et lorsque ce dernier ne peut tolérer la probabilité de collisions inhérente à l'ALOHA, un mécanisme a été ajouté pour diminuer la probabilité de non détection d'un canal occupé. Dans [5], selon la proposition contenue dans [9], des portions de préambule de synchronisation sont multiplexées aux données de telle sorte que, sur la durée spécifiée d'un CCA (*Clear Channel Assessment*), un nœud reçoive une de ces portions plus facilement détectable que les données modulées.

Le protocole CSMA/CA est plus complexe qu'ALOHA, tout en restant néanmoins assez facile à implémenter. Cependant, la méthode n'est pas déterministe car le temps d'accès maximal garanti n'est pas borné.

ALOHA serait un choix intéressant comme méthode d'accès si elle est utilisée dans sa version synchronisée appelé *slotted ALOHA*. Dans cette version, le temps est divisé en slots, et l'émetteur ne peut émettre qu'au début d'une slot. Ceci évite les collisions partielles et divise ainsi par deux le nombre total de collisions par rapport à ALOHA, ce qui double son efficacité qui passe à 36%.

D'autres couches MAC [5] basées sur l'utilisation des codes de saut comme le CDMA (*Code Division Multiple Access*) et TH-UWB (*Time Hopping-Ultra Wide Band*) ont été étudiées pendant cet état de l'art. Ces protocoles MAC reposent sur le papier [6] qui introduit explicitement le concept d'accès multiple grâce au code de saut temporel.

Dans [7], les auteurs proposent une vision finalement très proche du CDMA où les nœuds accèdent au canal selon le protocole ALOHA et où l'initiation d'une communication est réalisée par un échange de paquets RTS/CTS. Ces paquets portent un code de saut temporel de contrôle

commun à tous les nœuds, ce qui facilite la détection d'un paquet arrivant. Dans le paquet RTS, l'émetteur indique au récepteur le code de saut choisi pour le paquet de données. Si le destinataire est disponible, il répond par un paquet CTS à l'émetteur qu'il est prêt à recevoir et commute son récepteur pour recevoir le code indiqué par l'émetteur.

Utilisant le même principe de séparation des canaux de contrôle et de données, [8] présente un protocole MAC qui met en jeu des communications initiées par le récepteur. Chaque nœud prêt à recevoir des données, envoie à ses voisins un paquet RTR (*Ready To Receive*) auquel répondront, par un paquet RTS, ceux d'entre eux qui auront un message à lui transmettre. Ce paquet RTR inclut un champ qui précise le code de saut, choisi aléatoirement par l'initiateur, que doivent utiliser les nœuds pour la communication. L'initiateur reçoit, pendant une fenêtre de contention, les différents RTS et sélectionne parmi eux l'expéditeur de son choix en lui envoyant un CTS.

La plupart des protocoles MAC basés sur une couche radio TH-UWB proposent de séparer les paquets de contrôle des paquets de données par l'utilisation d'un code commun et de codes dédiés (code de saut choisi par l'émetteur pour le paquet des données). Ces derniers peuvent être alloués de manière statique ou dynamique. De plus, les nœuds doivent émettre des paquets périodiquement pour que tout nœud garde une information à jour des codes de ses voisins. En allocation dynamique, un code pour porter les données est choisi aléatoirement dans un ensemble de codes disponibles ; cela nécessite que le destinataire ou l'émetteur spécifient quel code sera utilisé pour la transmission des données dans les paquets d'initiation de la transaction (RTS/CTS).

Pour des raisons de limitations de fonctionnalités, nous n'allons pas retenir ces protocoles pour l'implémentation de notre contribution de thèse. En effet, le concept de canaux dédiés signifie que lors d'une communication dans le réseau, un nœud A ne pourra échanger seulement qu'avec un nœud B. Il n'y a donc pas de diffusion possible. Cela pourrait poser un problème au niveau de la localisation qui est notre objectif final. Pour notre implémentation, nous souhaitons qu'un nœud puisse localiser tous ces voisins pendant un échange de paquet de données où des trames de diffusions seront sans doute avantageusement utilisées.

3. CONCLUSION

Cet état de l'art a permis de présenter les principes des transmissions radio impulsionnelle UWB à bas débit en faisant tout d'abord une description de l'état de l'art des techniques de transmission, puis du contexte réglementaire et normatif. Cela nous a amené à poser les bases du

système UWB-IR (Ultra Wide Bande-Impulse Radio) que nous allons étudier pendant notre thèse .

Une étude conjointe théorique et pratique de la couche MAC et de la couche PHY permettra de proposer une MAC adaptée aux communications UWB et au cahier des charges de la localisation.

Notre système sera basé sur des composants radio UWB utilisant plusieurs impulsions pour un symbole, émises selon une modulation OOK, qui, comme nous l'avons vu en 3.2., est la technique la plus simple et la plus adaptée.

Notre mécanisme de localisation basé sur le temps de vol (ToF) devrait nous permettre d'avoir des mesures en temps réel du signal pour avoir une estimation de la distance (*ranging*). Une méthode range-based devrait satisfaire à ces exigences. Ce sera la deuxième partie de notre thèse qui portera sur la proposition d'un algorithme de calcul de distance permettant des résultats plus précis.

Pour la suite de cette étude, nos recherches seront orientées vers le prototypage, le test et l'analyse des performances des couches MAC, en particulier ALOHA. Nous pourrons ainsi les comparer ses performances aux autres MAC présentées dans ce papier.

4. REFERENCES

- [1] 802.15.4a: IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems— Local and metropolitan area networks— Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs).
- [2] ECC/DEC/(06)12, "ECC Decision of 01 December 2006 amended 31 October 2008 on supplementary regulatory provisions to ECC/DEC/(06)04 for UWB devices using mitigation techniques," Electronic Communication Committee, October 2008.
- [3] ECMA, Standard ECMA-368 : High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard, déc. 2005.
- [4] Guy Pujolle, Les Réseaux, Edition 2011: Les réseaux sans fil, Partie VI, chapitre 21 High Rate Ultra Wideband PHY and MAC Standard, déc. 2005.
- [5] Benoît Miscopain : Systèmes UWB impulsionnels non cohérents pour les réseaux de capteurs : coexistence et coopération.
- [6] R. A. Scholtz, "Multiple Access with Time-Hopping Impulse Modulation," Conference record of the IEEE Military Communications Conference. MILCOM'93. Vol. 2, pp. 447-450, 1993.
- [7] M.-G. Di Benedetto, L. De Nardis, M. Junk, and G. Giancola, : Uncoordinated, Wireless, Baseborn medium access for UWB communication

networks,” In Mobile Networks and applications Vol 10 N^o 5. Springer editions, 2005.

- [8] H. Anouar and C. Bonnet, “A Self-Balanced Receiver-Oriented MAC Protocol for Multiple Channels Multihop Ad-Hoc Networks,” in VTC’ Spring 2005, 61st Semiannual IEEE Vehicular Technology Conference, 30th May - 1st June, 2005, Stockholm, Sweden, May 2005.
- [9] Y. Qi, H. bang Li, S. Hara, and R. Kohno, “Clear channel assessment (cca) with multiplexed preamble symbols for impulse ultra-wideband (uwb) communications,” Ultra-Wideband, The 2006 IEEE 2006 International Conference on, pp. 675–680, Sept. 2006.
- [10] DecaWave: DecaRanging, Ranging Demo Application (PC Version)/DW1000-MPW2.5, Hardware Application/DWEVB1000, DW1000-MPW2.5 Evaluation Board.